

مدلسازی استاتیکی و دینامیکی تأثیر تکیه گاههای کمکی فیکسچر بر تختی و زبری سطح حاصل از ماشینکاری

محمد رضا بهزادی پور

بهرز آرزو
استادیار

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

چکیده

در این مقاله تأثیر پارامترهای تکیه گاههای کمکی فیکسچر (شامل: موقعیت، صلبیت، میرایی و میزان پیش بار تکیه گاه) بر روی تختی و زبری سطح حاصل از ماشینکاری بروش استاتیکی و دینامیکی مورد بررسی قرار میگیرد. قطعه کار بصورت صلب و در تماس با شش جاساز با آرایش (۱-۲-۳) و سه روبنده، هر یک در مقابل یک سطح مبنا در نظر گرفته میشود و عامل تغییر شکل الاستیک و میرایی تنها به محل تماس قطعه کار با اجزای فیکسچر خلاصه میشود. برای تأیید نتایج تئوری بدست آمده، تستهای ماشینکاری شامل فرزکاری و سنگزنی خزشی بر روی مدل‌های پره توربین گازی انجام گرفته است.

کلمات کلیدی

ماشینکاری، فیکسچر، تکیه گاه کمکی، جاساز، روبنده.

Analytical Static and Dynamic Models for Rigid Workpiece Held in a Machining Fixture

M. R. Behzadi
Ph. D. of Mechanical

B. Arezoo
Assistant Professor

Faculty of Mechanical Engineering
Amirkabir University of Technology

Abstract

This paper presents analytical static and dynamic models of a rigid workpiece held in a machining fixture in contact with locators and clamps (in a 3-2-1 scheme) and three supports (in three locating planes) influenced by machining forces and moments. The models are used to predict effects of support parameters including support position, rigidity, and preload on improving machining accuracies. Milling and creep feed grinding experiments are performed to verify the model. The model can be used to develop present computer aided fixture design systems that consider only locators and clamps in a force analysis module.

Keywords

Machining, Fixture, Support, Locator, Clamp

بدلیل اینکه افزایش بیش از حد تعداد جاسازها و همچنین بزرگ بودن سطح تماس جاسازها با قطعه کار باعث مخدوش شدن دقت و قابلیت تکرار فیکسچر میشود، در بسیاری از موارد باید از تکیه گاههای کمکی (شکل ۱) در کنار جاسازها و روبنده‌ها استفاده نمود. این موارد به طور عمده به سه گروه تقسیم‌بندی میشوند:

- ۱- ضعف صلبیت قطعه کار ممکن است بگونه‌ای باشد که نتوان از تغییر شکل‌های الاستیک قطعه زیر بار ماشینکاری جلوگیری نمود.
- ۲- بالا بودن نیروی ماشینکاری به جهت جنس قطعه کار و یا طبیعت فرایند ماشینکاری حتی در زمان ماشینکاری پرداخت ممکن است تقویت ساختار گیرش قطعه کار را طلب بنماید.
- ۳- پیچیدگی هندسی و اصولاً طرح قطعه کار از نظر سطوح مرجع ممکن است به گونه‌ای باشد که قطعه کار در تماس با جاسازها و روبنده‌ها به تنهایی نتواند تعادل مناسب را در مقابل نیروهای ماشینکاری داشته باشد.

۱- تاریخچه

در سال ۱۹۶۵ «شاوکی» برای اولین بار اثر صلبیت اجزاء فیکسچر بر دقت ماشینکاری را با یک مدل دو بعدی مورد بررسی قرار داد [۱] و در ادامه تحقیقات خود طی سالهای ۱۹۶۶ و ۱۹۶۷ با انجام آزمایشاتی، صلبیت جاسازها و روبنده‌ها را اندازه‌گیری نمود [۲ و ۳]. در سال ۱۹۸۷ اولین آنالیز المان محدود قطعه‌کار در تماس با جاسازها و روبنده‌ها توسط «لی» انجام شد [۴]. «مناسا» در سال ۱۹۹۱ روش انتخاب موقعیت بهینه جاسازها را ارائه نمود [۵]. طی سالهای ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۰ نیز تحقیقات گسترده‌ای بر روی آنالیز تلورانسی فیکسچرهای ماشینکاری صورت گرفته که در این تحقیقات تنها اثر جاسازها و روبنده‌ها بر دقت فیکسچر مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰].

تاریخچه فوق به بررسیهای استاتیکی فیکسچرهای ماشینکاری مربوط می‌شود و در حوزه بررسیهای دینامیکی میتوان به بررسی اثر تکیه‌گاههای کمکی بر افزایش نرخ براده برداری قطعات توخالی و یا دیواره‌های نازک توسط «دایمون» در سال ۱۹۸۵ و مدل دینامیکی قطعه کار در تماس با جاسازها و روبنده‌ها توسط «میتال» در سال ۱۹۹۱ اشاره نمود [۱۱ و ۱۲]. در یک جمع‌بندی میتوان گفت که مدل استاتیکی و دینامیکی مجموعه قطعه کار و فیکسچر شامل جاسازها و روبنده‌ها تحت بارهای ماشینکاری از جنبه‌های مختلف و به روشهای مختلف مورد تحلیل قرار گرفته است و لیکن برای تکیه‌گاههای کمکی به صورت مجزا تحلیل خاصی صورت نگرفته است و در تحقیقات انجام شده توسط «دایمون» [۱۱] نیز تکیه‌گاههای کمکی بصورت تجربی و بدون در نظر گرفتن پارامترهای تکیه‌گاه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این مقاله با صلب فرض کردن قطعه کار، دو مدل استاتیکی و دینامیکی برای بررسی اثر تکیه‌گاههای کمکی بر تختی و صافی سطح حاصل از ماشینکاری ارائه میشوند. پارامترهای تکیه‌گاه در مدل استاتیکی عبارتند از: موقعیت، میزان پیش بار و صلبیت تکیه‌گاه کمکی (که خود تابعی از شکل، جنس و سختی تکیه‌گاه میباشد) و پارامترهای مورد بررسی در مدل دینامیکی عبارتند از: موقعیت، صلبیت و میرایی تکیه‌گاه کمکی.

۲- مدلسازی استاتیکی تاثیر اعمال تکیه‌گاه کمکی بر تختی سطح حاصل از ماشینکاری

فرضیات انجام شده در مدل استاتیکی عبارتند از:

- ۱- بار ماشینکاری به صورت متمرکز ولی با سه مؤلفه نیرو و سه مؤلفه گشتاور مدل می‌شود.
 - ۲- ابزار برشی و قطعه کار صلب فرض می‌شوند.
 - ۳- رفتار مکانیکی فیکسچر خصوصاً در محل تماس اجزاء فیکسچر با قطعه کار خطی فرض می‌شود.
 - ۴- از تأثیر تغییر شکل‌های الاستیک بر تغییر عمق و نیروی ماشینکاری صرف‌نظر می‌شود.
- اصولاً فرض صلب بودن قطعه کار در این مدل در رابطه با بسیاری از قطعات و خصوصاً قطعات چدنی و فولادی که دارای دیواره‌های ضعیف و نازک نیستند، صادق است.

در صورتیکه قطعه کار به سه سطح مرجع متعامد آن که برای تعبیه جاسازها استفاده می‌شود، خلاصه شود. می‌توان آن را مطابق شکل (۲) به صورت یک مکعب مستطیل با وجوه موازی صفحات مختصات نمایش داد. این موضوع تنها برای سادگی عبارات ریاضی ارائه شده در نظر گرفته شده و در صورتیکه اجزاء فیکسچر بر روی سطوح منحنی قطعه کار قرار گیرند، بازم با مشخص بودن طرح قطعه کار و بردار نرمال در نقطه تماس، راستای نیروی عکس العمل در محل تماس اجزاء فیکسچر مشخص است و می‌توان همین مدل را مجدداً مورد استفاده قرارداد. با فرض رفتار قطعه کار به صورت شبه‌استاتیک با وجود حرکت‌های محدود و تدریجی قطعه ناشی از کرنش‌های الاستیک در محل‌های تماس، در تمام لحظات روابط تعادل نیرو و گشتاور بر قطعه کار حاکم خواهند بود [۱۳]:

$$\sum F = 0 \quad (1)$$

$$\sum M = 0 \quad (2)$$

علاوه بر ۶ معادله نیرو و گشتاور، برای هر محل تماس قطعه کار با اجزاء فیکسچر که به صورت فنر با رفتار خطی مدل می‌شود، روابط زیر برقرار است:

$$F_{li} = K_{li} \cdot \Delta_{li} \quad ; \quad i=1..6 \quad (3)$$

$$F_{cj} = K_{cj} \cdot \Delta_{cj} \quad ; \quad j=1..3 \quad (4)$$

$$F_{sk} = K_{sk} \cdot \Delta_{sk} \quad ; \quad k=1..3 \quad (5)$$

به این ترتیب با وجود ۶ جاساز (اصل ۳-۲-۱ و استفاده از ۳ سطح مرجع)، ۳ روبنده (یک روبنده در مقابل هر سطح مرجع) و سه تکیه‌گاه کمکی (یک تکیه‌گاه کمکی بر روی هر سطح مرجع)، از روابط (۳)، (۴) و (۵) دوازده معادله بدست می‌آید. با توجه به صلب فرض کردن قطعه کار، تغییر شکل الاستیک در هر محل تماس به شکل زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$\Delta_{li} = ([d]_{3 \times 1} + [\theta]_{3 \times 1} \times [r_{li}]_{3 \times 1}) \cdot [n_{li}]_{3 \times 1} \quad (6)$$

$$\Delta_{cj} = ([d]_{3 \times 1} + [\theta]_{3 \times 1} \times [r_{cj}]_{3 \times 1}) \cdot [n_{cj}]_{3 \times 1} \quad (7)$$

$$\Delta_{sk} = ([d]_{3 \times 1} + [\theta]_{3 \times 1} \times [r_{sk}]_{3 \times 1}) \cdot [n_{sk}]_{3 \times 1} \quad (8)$$

در ابتدا محل‌های تماس بدون اصطکاک فرض می‌شوند. برای ۱۲ عکس العمل اجزاء فیکسچر و ۶ مؤلفه جابجایی خطی و دورانی قطعه کار که همگی مجهول می‌باشند، ۱۸ معادله شامل شش معادله از روابط (۱) و (۲)، و دوازده معادله از روابط (۳)، (۴) و (۵) وجود دارند، که می‌توان این دستگاه ۱۸×۱۸ خطی را در یک رابطه ماتریسی به شکل زیر خلاصه نمود [۱۵]:

$$[K]_{18 \times 18} \cdot [X]_{18 \times 1} = [F]_{18 \times 1} \quad (9)$$

حال با فرض عدم وجود اصطکاک در محل‌های تماس، مسئله در سه مرحله حل می‌شود:

مرحله اول - تماس قطعه کار با جاسازها و بسته شدن روبنده‌ها:

موقعیت مرجع قطعه کار موقعیتی است که جاسازها قبل از بسته شدن روبنده‌ها برای قطعه کار ایجاد می‌کنند. پس از بسته شدن روبنده‌ها، نیروهای پیش‌بار اولیه (F_{cj0}) در محل‌های تماس روبنده با قطعه کار اعمال می‌شوند. به این ترتیب به دلیل تغییر شکل الاستیک در محل تماس قطعه کار با جاسازها (Δ_{ii})، قطعه دچار جابجایی الاستیک $[d']_{1 \times 3}$ و $[\theta']_{1 \times 3}$ می‌شود. برای حل دستگاه (۹) در این مرحله، نیروی عکس‌العمل روبنده‌ها (F_{cj0}) می‌باشد و نیازی به استفاده از رابطه (۴) و ضریب سختی روبنده‌ها نمی‌باشد. همچنین به علت عمل نکردن تکیه‌گاه‌های کمکی و نیروهای ماشینکاری، در این مرحله پیش‌بار و ضریب سختی تکیه‌گاه‌های کمکی و همچنین بار ماشینکاری باید برابر صفر قرار گیرند. لذا با شرایط ذیل دستگاه (۹) حل خواهد شد:

$$[R]_{3 \times 1} = [M]_{3 \times 1} = 0 \quad (10-1)$$

$$F_{cj} = F_{cj0}; K_{cj} = 0 \quad (10-2)$$

$$F_{sk} = 0; K_{sk} = 0 \quad (10-3)$$

d و θ محاسبه شده از حل دستگاه (۹) با شرایط فوق d' و θ' نامگذاری می‌شوند، که در مراحل بعد مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مرحله باید کنترل شود که نیروی پیش‌بار روبنده‌ها بگونه‌ای انتخاب شده باشند که نیروی عکس‌العمل جاسازها مثبت باشند و همچنین میزان انحراف قطعه بیش از حد مجاز نباشد.

مرحله دوم - تماس تکیه‌گاه‌های کمکی با قطعه کار

با تماس تکیه‌گاه‌های کمکی، به قطعه کار نیروی پیش‌بار (F_{sk0}) اعمال می‌شود، که باعث تغییر عکس‌العملها و جابجایی قطعه کار می‌گردد. نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاه‌های کمکی در این مرحله برابر (F_{sk0}) می‌باشد و نیازی به استفاده از ضریب سختی در رابطه (۵) نمی‌باشد. برای محاسبه بردارهای جابجایی قطعه d و θ که به تنهایی توسط پیش‌بار تکیه‌گاه کمکی ایجاد شده، در رابطه (۳) به جای Δ_{ii} باید $\Delta_{ii} + \Delta'_{ii}$ را جایگزین نمود. به این ترتیب d و θ محاسبه شده از دستگاه (۹)، “ d و θ نامگذاری می‌شوند. لذا دستگاه (۹) این بار باید با شرایط زیر حل شود:

$$[R]_{3 \times 1} = [M]_{3 \times 1} = 0 \quad (11-1)$$

$$F_{ii} = K_{ii} \cdot (\Delta_{ii} + \Delta'_{ii}) \quad (11-2)$$

$$F_{cj} = K_{cj} \cdot \Delta_{cj} + F_{cj0}; F_{sk} = F_{sk0}; K_{sk} = 0 \quad (11-3)$$

با توجه به اینکه تکیه‌گاه‌های کمکی در صفحه جاسازها و به موازات آنها قرار می‌گیرند، اعمال پیش‌بار آنها می‌تواند باعث ضعف تماس قطعه کار با جاسازها گردد. لذا پیش‌بار، ضریب سختی و محل تکیه‌گاه کمکی باید به گونه‌ای انتخاب شود که عکس‌العمل جاسازها منفی نشوند.

مرحله سوم - اعمال بارهای ماشینکاری

هدف از اجرای این مرحله، محاسبه خطای کلی d و θ ناشی از تغییر شکل‌های الاستیک در محل‌های تماس در اثر اعمال عکس‌العملهای اجزای فیکسچر و بارهای ماشینکاری می‌باشد. جاسازها همانند فنرهایی هستند که از موقعیت صفر مرجع خود در اثر بردار جابجایی “ $\Delta_{ii} + \Delta'_{ii} + \Delta''_{ii}$ ” پیش فشرده شده‌اند. لذا با وارد کردن نیروها و گشتاورهای ماشینکاری و با شرایط ذیل باید دستگاه (۹) را حل نمود:

$$F_{li} = K_{li} \cdot (\Delta_{li} + \Delta'_{li} + \Delta''_{li}) \quad (12-1)$$

$$F_{cj} = K_{cj} \cdot (\Delta_{cj} + \Delta''_{cj}) + F_{cj0} \quad (12-2)$$

$$F_{sk} = K_{sk} \cdot \Delta_{sk} + F_{sk0} \quad (12-3)$$

d و θ محاسبه شده در این مرحله d'''' و θ'''' نامگذاری می‌شوند و در نهایت بردار جابجایی کل قطعه [d] و $[\theta]$ نسبت به موقعیت مرجع اولیه آن به شکل زیر بدست می‌آید:

$$[d] = [d'] + [d''] + [d'''] \quad (13)$$

$$[\theta] = [\theta'] + [\theta''] + [\theta'''] \quad (14)$$

برای مدلسازی سطح حاصل از ماشینکاری باید جابجایی قطعه کار نسبت به ابزار زیر بار ماشینکاری را بدست آورد. سه مؤلفه جابجایی قطعه کار نسبت به ابزار عبارتند از:

$$\delta_{st,x} = d_x - r_{my} \cdot \theta_z + r_{mz} \cdot \theta_y \quad (15-1)$$

$$\delta_{st,y} = d_y + r_{mx} \cdot \theta_z - r_{mz} \cdot \theta_x \quad (15-2)$$

$$\delta_{st,z} = d_z - r_{mx} \cdot \theta_y + r_{my} \cdot \theta_x \quad (15-3)$$

از سه مؤلفه فوق بسته به نوع و هندسه ابزار و هندسه ماشینکاری، مؤلفه عمود بر سطح حاصل از ماشینکاری، تعیین کننده انحراف ناشی از جابجایی قطعه نسبت به ابزار می‌باشد.

در این مدل پارامترهای شعاع تماس، کیفیت سطح تماس، ابعاد و جنس و سختی تکیه‌گاه کمکی همگی در ضریب سختی K_{sk} خلاصه می‌شوند و میزان پیش‌بار تکیه‌گاه کمکی و موقعیت آن، دو پارامتر دیگر مربوط به تکیه‌گاه کمکی می‌باشند که مستقیماً در این مدل وارد شده‌اند.

برای وارد کردن اصطکاک در این مدل، به راحتی می‌توان بردار جابجایی قطعه در محل تماس مماس بر سطح تماس و یا به عبارتی جهت اعمال نیروی اصطکاک را با مشخص بودن هندسه قطعه کار بر حسب بردار جابجایی [d] و $[\theta]$ و بردار موقعیت نقاط تماس بدست آورد. به عنوان مثال برای سه جاساز واقع در صفحه (X-Y)، مولفه‌های x و y جابجایی قطعه کار در محل تماس با جاسازها برابرند با:

$$\delta_{lix} = d_x - r_{liy} \cdot \theta_z + r_{liz} \cdot \theta_y \quad ; \quad i=1..3 \quad (16-1)$$

$$\delta_{liy} = d_y + r_{lix} \cdot \theta_z - r_{liz} \cdot \theta_x \quad ; \quad i=1..3 \quad (16-2)$$

با فرض:

$$A = \sqrt{\delta_{lix}^2 + \delta_{liy}^2} \quad (17)$$

مؤلفه‌های نیروی اصطکاک بصورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$f_{lix} = \mu \cdot F_{li} \cdot \delta_{lix} / A \quad (18-1)$$

$$f_{liy} = \mu \cdot F_{li} \cdot \delta_{liy} / A \quad (18-2)$$

مقدار نیروی اصطکاک نیز برابر حاصل ضرب ضریب اصطکاک در عکس العمل عمودی در محل تماس می‌باشد. بنابراین معادلات تعادل نیرو (۱) و تعادل گشتاور (۲)، در دستگاه (۹) بدون اضافه شدن متغیر جدیدی به دستگاه با در نظر گرفتن مؤلفه‌های نیروی اصطکاک تصحیح می‌شوند. البته در این صورت دستگاه معادلات غیر خطی بدست می‌آید که حل آن به روش تحلیلی و حتی با استفاده از برنامه «مپل» غیر ممکن می‌باشد. لذا با استفاده از مدل اصطکاکی، نمی‌توان همانند قبل با یکبار حل دستگاه، رابطه خطای ماشینکاری را بصورت تابعی از موقعیت نیروی ماشینکاری و موقعیت تکیه‌گاههای کمکی تعیین نمود. لیکن در صورت اعمال نیروی ماشینکاری در یک محل مشخص و برای یک موقعیت خاص تکیه‌گاههای کمکی، می‌توان دستگاه (۹) را بدون در نظر گرفتن اصطکاک حل نمود و بردار جابجایی و جهت اعمال نیروی اصطکاک برای آن شرایط خاص را تعیین نمود. در این حالت وارد کردن مؤلفه‌های اصطکاک در دستگاه معادلات منجر به غیر خطی شدن دستگاه نمی‌شود و براحتی عکس‌العملها و خطاهای ماشینکاری با وجود اصطکاک تعیین می‌شوند و با این ترتیب می‌توان از تصمیم‌گیری در رابطه با تکیه‌گاه کمکی در شرایط واقعی تری اطمینان حاصل نمود.

لازم به ذکر است که اگر تعداد اجزاء فیکسچر به بیشتر از ۱۲ عدد افزایش یابد، با توجه به روش استفاده شده در این مدل، به ازای اضافه شدن هر مجهول یک معادله به شکل روابط (۳)، (۴) یا (۵) نیز به دستگاه (۹) اضافه خواهد شد و تنها ابعاد دستگاه معادلات افزایش می‌یابد، که به راحتی قابل حل می‌باشد.

۳- مدلسازی دینامیکی تاثیر اعمال تکیه‌گاه کمکی بر ارتعاشات اجباری قطعه‌کار

در مدل سه‌بعدی فرضیات زیر صورت می‌گیرد:

- ۱- قطعه‌کار، ابزار برشی و ساختار ماشین‌ابزار صلب فرض می‌شوند و تماس قطعه‌کار با هریک از جاسازها، روبنده‌ها و تکیه‌گاههای کمکی با یک فنر خطی و دمپر استهلاک و اسکوز مدل می‌شوند (شکل ۲).
- ۲- بارهای ماشینکاری بصورت نیرو و گشتاور متمرکز و هارمونیک در نظر گرفته می‌شوند.
- ۳- این مدل تنها ارتعاشات اجباری را در بر می‌گیرد و ارتعاشات خود القا (Regenerative) را شامل نمی‌شود. لذا مقدار دامنه نیروی ماشینکاری ثابت و سطح خام ماشینکاری شونده یکنواخت و بدون موج فرض می‌شود. شکل ماتریسی معادله دیفرانسیل حاکم بر ارتعاشات اجباری قطعه‌کار صلب با شش درجه‌آزادی، در تماس با اجزاء فیکسچر و با تحریک خارجی هارمونیک توسط نیروی ماشینکاری بشکل زیر می‌باشد:

$$[M]_{6 \times 6} \cdot \ddot{[X]}_{6 \times 1} + [C]_{6 \times 6} \cdot \dot{[X]}_{6 \times 1} + [K]_{6 \times 6} \cdot [X]_{6 \times 1} = [F_m(t)]_{6 \times 1} \quad (19)$$

که در این روابط $[M]_{6 \times 6}$ تابعی از جرم و اینرسی دورانی قطعه حول سه محور مختصات و موقعیت مرکز جرم (یا بعبارتی نحوه توزیع جرم) در یک سیستم مختصات کارترین می‌باشد؛ $[K]_{6 \times 6}$ یا ماتریس ضریب سختی، تابعی از ضریب سختی معادل تماس اجزاء فیکسچر با قطعه‌کار و بردارهای موقعیت این اجزاء و $[C]_{6 \times 6}$ تابعی از ضریب استهلاک معادل تماس اجزاء فیکسچر با قطعه‌کار و موقعیت این اجزاء می‌باشد. $[X]_{6 \times 1}$ بردار جابجایی دینامیکی قطعه‌کار شامل سه مؤلفه بردار جابجایی دینامیکی خطی $[D]_{3 \times 1}$ و سه مؤلفه بردار جابجایی دینامیکی دورانی $[\Theta]_{3 \times 1}$ قطعه‌کار می‌باشد. $[F_m(t)]_{6 \times 1}$ نیز با فرض اعمال بار ماشینکاری بصورت هارمونیک بشکل زیر خواهد بود:

$$[F_m(t)]_{6 \times 1} = [R]_{6 \times 1} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (20)$$

که در رابطه فوق فرکانس تحریک (ω) و دامنه تحریک $[R]_{6 \times 1}$ تابعی از جنس قطعه کار، هندسه ابزار، ابعاد سطح مقطع براده، تعداد تیغه درگیر ابزار، میزان درگیری ابزار با قطعه کار و سرعت دوران محور فرز می باشند. پاسخ ماندگار سیستم به تحریک $[F_m(t)]_{6 \times 1}$ به شکل زیر خواهد بود:

$$[X(t)] = [U] \cdot \sin(\omega \cdot t) + [V] \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (21)$$

با جایگزین کردن رابطه (21) در رابطه (19) برای دوازده عنصر مجهول $[U]_{6 \times 1}$ و $[V]_{6 \times 1}$ ، دوازده معادله بشکل زیر بدست می آید:

$$(-\omega^2 [M] + [K]) \cdot [U] - \omega [C] \cdot [V] = [R] \quad (22-1)$$

$$\omega [C] \cdot [U] + (-\omega^2 [M] + [K]) \cdot [V] = 0 \quad (22-2)$$

در نهایت میزان دامنه ارتعاشات قطعه در شش درجه آزادی به صورت برآیند مؤلفه های U و V در آن درجه آزادی خواهد بود:

$$[X] = \sqrt{[U]^2 + [V]^2} \quad (23)$$

و مؤلفه های دامنه ارتعاشات زیر ابزار که عامل افزایش زبری سطح و خطای حاصل از ماشینکاری می باشند، به شکل زیر بدست می آیند:

$$\delta_{dyn.x} = D_x - r_{my} \cdot \Theta_z + r_{mz} \cdot \Theta_y \quad (24-1)$$

$$\delta_{dyn.y} = D_y + r_{mx} \cdot \Theta_z - r_{mz} \cdot \Theta_x \quad (24-2)$$

$$\delta_{dyn.z} = D_z - r_{mx} \cdot \Theta_y + r_{my} \cdot \Theta_x \quad (24-3)$$

البته در بررسی ارتعاشات یک سیستم و تعیین پاسخ فرکانسی، همیشه نسبت فرکانس تحریک به فرکانس طبیعی غیر مستهلک سیستم و نسبت ضریب میرایی به ضریب میرایی بحرانی مورد استفاده قرار می گیرد که برای تعیین نسبت های فوق باید فرکانس طبیعی مستهلک و غیر مستهلک سیستم را تعیین نمود. در این مدل طرح، جنس و سختی تکیه گاه کمکی در پارامترهای K_{sk} و C_{sk} خلاصه میشوند.

۴- بررسی تجربی

۴-۱- تجهیزات و روشهای تست

برای تأیید روشهای تئوری ارائه شده، یکسری تستهای ماشینکاری بر روی طرح پره توربین گازی مدل GE-F5 (بعنوان قطعه کار) ترتیب داده شد. علت انتخاب پره توربین، شکل هندسی پیچیده و نیاز به تعبیه تکیه گاه کمکی در طرح فیکسچر ماشینکاری آن بود. علاوه بر پره های فابریک از جنس اینکونل (LC) ۷۳۸ که بروش ریخته گری دقیق برای این پروژه تهیه شدند، چند عدد پره نیز از جنس چدن خاکستری GG25 نیز با همین طرح جهت ماشینکاری ریخته گری شدند.

ماشینکاری بدو روش فرزکاری (افقی و عمودی) و سنگزنی خزشی انجام گرفت. ابزارهای فرزکاری مورد استفاده در این تستها عبارت بودند از: فرزهای انگشتی با قطرهای ۱۰ و ۱۸ میلیمتر (روسی) و ۲۰ میلیمتر (تیتکس پلاس) با زاویه ماریچ ۲۵° و چهار یا شش لبه برنده از جنس فولاد تندبر و همچنین فرز کف تراش اینزرتی با دو و سه لبه با تیغچه‌های کاربیدی گرید «K20». تنها سنگ مورد استفاده، چرخ سنگ شماره «43A36D8VAIV6H3» مناسب برای سنگزنی خزشی بود. فرزکاری با ماشین فرز «دکل» CNC دو و نیم محوره مدل «FP4MA» با دقت مکانیکی ۰/۰۱ میلیمتر و دقت الکترونیکی ۰/۰۰۱ میلیمتر انجام شد. سنگزنی با ماشین سنگ دیجیتال خزشی «هانی - بلوم» مدل HFS با دقت مکانیکی و الکترونیکی معادل ۰/۰۰۱ میلیمتر انجام گرفت.

برای متروالوژی سطح حاصل از ماشینکاری از یک مجموعه ساعت دیجیتال مدل 546-257B با قابلیت نمایش 0.001mm و دقت 0.002mm و یک کابل رابط و ثبات و پردازشگر اطلاعات مدل DP1HS ساخت شرکت «میتوتویو» استفاده شد. ساعت توسط یک پایه مغناطیسی صلب به کله‌گی ماشین ابزار بسته میشود، به گونه‌ای که ارتعاشات ماشین به ساعت انتقال داده نشود. با حرکت محورهای ماشین و تماس ساعت با قطعه کار در حین ماشینکاری (On-Line) یا بعد از آن (Off-Line) پروفیل سطح حاصل از ماشینکاری به صورت نقطه به نقطه ثبت میشود. قابلیت نمونه‌گیری پردازشگر با فاصله زمانی حداقل 0.3 ثانیه بود و در صورت تنظیم میزان پیشروی ماشین به میزان 0.2mm/sec امکان ثبت نقاط با فواصل 0.01mm وجود داشت. با این روش اندازه‌گیری، خطاهای حرکتی محورهای ماشین ابزار که مد نظر این تحقیق نبود، از اندازه‌گیری حذف میشود.

۴-۲- بررسی نتایج

نتایج تنوری حاصل از مدل استاتیکی و نتایج تستهای فرزکاری طرح پره توربین ریخته‌گری شده از چدن خاکستری و تستهای سنگزنی خزشی پره توربین مدل «GE-F5» از جنس اینکونل 738LC بترتیب در منحنیهای (۱) و (۲) خلاصه شده‌اند. در کلیه این تستها پس از صاف کردن قسمت گوه‌ای انتهای پره، ماشینکاری بصورت تخت در عرض پره (و بدون انجام ماشینکاری فرم خاص پره‌های توربین فابریک) انجام شده است. موقعیت اجزاء فیکسچر در تستهای فرزکاری و سنگزنی بترتیب در جداول (۱) و (۲) مشخص شده‌اند.

تختی سطح اندازه‌گیری شده در تستهای ماشینکاری، با تختی سطح محاسبه شده توسط مدل استاتیکی در منحنی‌های (۱) و (۲) با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

همانگونه که در منحنی‌های (۱-الف) و (۲-الف) ملاحظه می‌شود، بهترین محل تعبیه تکیه‌گاه کمکی زیر قسمت گوه‌ای پره، برای رسیدن به بهترین تختی سطح حاصل از ماشینکاری برخلاف تصور عمومی طراحان فیکسچر، در وسط عرض پره و وسط مسیر ماشینکاری زیر ناحیه گوه‌ای نمی‌باشد. در توجیه این نتیجه می‌توان گفت که به علت محدودیت در محل تعبیه جاسازها و روپنده‌ها و همچنین یکسان نبودن هندسه تماس جاسازها در نواحی مختلف پره توربین با سطوح مسطح و منحنی، ضریب صلبیت مستقیم در راستای عمود بر سطح حاصل از ماشینکاری در طول مسیر ماشینکاری و قبل از تعبیه تکیه‌گاه کمکی یکسان نمی‌باشد. لذا بهترین موقعیت تکیه‌گاه برای رسیدن به بهترین تختی سطح، ضعیف‌ترین نقطه در طول مسیر ماشینکاری زیر قطعه کار می‌باشد، که عموماً این نقطه در وسط مسیر ماشینکاری واقع نمی‌گردد. لازم به توضیح است که آرایش فیکسچر فرزکاری و سنگزنی با یکدیگر متفاوت هستند، ولی بدلیل استفاده از یک جاساز سر کروی بر روی سطح مقعر «یرفویل» پره در هر دو طرح، ضعف صلبیت هر دو فیکسچر در یک طرف پره نمایان شده است و نتیجه مشابهی برای موقعیت بهینه تکیه‌گاه کمکی در فیکسچرهای سنگزنی و فرزکاری بدست آمده است.

منحنی‌های (۱-ب) و (۲-ب) نشان‌دهنده اثر صلبیت تکیه‌گاه کمکی بر تختی سطح حاصل از ماشینکاری می‌باشند. همانگونه که ملاحظه می‌شود افزایش صلبیت تا یک حد بهینه، باعث بهبود تختی سطح حاصل از ماشینکاری می‌گردد. در توجیه این موضوع میتوان گفت که انحراف قطعه در اثر نیروی ماشینکاری و نیروی پیش بار تکیه‌گاه کمکی در دو جهت مخالف میتوانند یکدیگر را خنثی نمایند. در صورتی که برای یک پیش‌بار معین میزان صلبیت از حدی بالاتر رود، انحراف حاصل از نیروی ماشینکاری کاهش یافته و قابلیت خنثی نمودن انحراف ناشی از پیش‌بار تکیه‌گاه را دارا نخواهد بود و لذا خطا افزایش می‌یابد.

منحنی‌های (۱-ج) و (۲-ج) معرف اثر پیش‌بار تکیه‌گاه کمکی بر تختی سطح حاصل از ماشینکاری می‌باشند. با افزایش پیش‌بار تا یک حد مشخص، نقش تقویتی تکیه‌گاه کمکی افزایش می‌یابد و کرنش ناشی از تکیه‌گاه و نیروی ماشینکاری یکدیگر را خنثی می‌نمایند. لیکن افزایش بیش از حد پیش‌بار خود باعث انحراف قطعه نسبت به ابزار و تضعیف پیش‌فشاردهی قطعه نسبت به جاسازها و ایجاد خطا می‌گردد. در کلیه منحنی‌های (۱) و (۲) انطباق قابل قبولی میان نتایج تئوری و تجربی به چشم می‌خورد.

زبری سطح اندازه‌گیری شده در تست‌های ماشینکاری با زبری سطح یا عبارتی دامنه ارتعاشات (محاسبه شده) توسط مدل دینامیکی در منحنی‌های (۳) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. منحنی (۳-الف) نشانگر تاثیر موقعیت تکیه‌گاه کمکی بر زبری سطح حاصل از ماشینکاری می‌باشد. مشابه نتایج بدست آمده از مدل استاتیکی و تختی سطح حاصل از ماشینکاری، برای دستیابی به بهترین صافی سطح نیز (با این طرح خاص قطعه و فیکسچر)، تکیه‌گاه کمکی باید در سمت چپ پره ($X_s=0$) قرار گیرد و این مؤید این نکته است که مجموعه فیکسچر و قطعه مورد تست، دارای ضعف صلبیت استاتیکی و دینامیکی در سمت چپ پره می‌باشند.

اثر صلبیت تکیه‌گاه کمکی بر صافی سطح حاصل از ماشینکاری در منحنی (۳-ب) نشان داده شده است. بعلاوه پایین بودن فرکانس تحریک نیروی ماشینکاری در تست‌های انجام شده و اصولاً در سرعت‌های متداول فرزکاری سنتی، افزایش صلبیت تکیه‌گاه کمکی باعث بالا رفتن فرکانس طبیعی مجموعه فیکسچر و قطعه کار و دور شدن آن از فرکانس تحریک می‌شود و لذا صافی سطح حاصل از ماشینکاری بهبود می‌یابد. همانگونه که در منحنی‌های (۳-الف) و (۳-ب) ملاحظه می‌گردد، اختلاف پیش‌بینی‌های مدل دینامیکی و نتایج عملی در رابطه با اثر موقعیت و صلبیت تکیه‌گاه کمکی بر صافی سطح حاصل از ماشینکاری ناچیز و قابل قبول می‌باشد.

در جدول (۳) صافی سطح حاصل از ماشینکاری پس از اعمال تکیه‌گاه‌های کمکی با نوک تماس فولادی و پلی‌اتیلنی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همانگونه که ملاحظه می‌شود با وجود اینکه صلبیت پلی‌اتیلن از فولاد بسیار پایین‌تر می‌باشد، زبری سطح حاصل از اعمال تکیه‌گاه کمکی با نوک پلی‌اتیلنی کمی بیشتر از زبری حاصل از نوک فولادی می‌باشد. علت این موضوع در ضریب استهلاک ساختاری بسیار بالای پلی‌اتیلن نهفته است. با افزایش ضخامت نوک پلی‌اتیلن زیر قطعه کار و با عبارتی افزایش حجم مواد، استهلاک ساختاری نیز افزایش می‌یابد و نتیجه آن کاهش ارتعاشات و بهبود زبری سطح حاصل از ماشینکاری می‌باشد.

همانگونه که در منحنی (۳-ج) ملاحظه می‌شود، نتایج تئوری حاصل از مدل دینامیکی و نتایج تست‌های ماشینکاری، در رابطه با تعیین اثر ضریب استهلاک معادل تکیه‌گاه کمکی، در صورتی با یکدیگر منطبق می‌شوند که ضرایب استهلاک و نسبت‌های میرایی بسیار بزرگ و غیر واقعی در مدل استفاده شوند. علت این انحراف بزرگ مدل ارائه شده در پیش‌بینی اثر ضریب استهلاک، فرضها و ساده‌سازیهایی انجام شده در این مدل و خصوصاً عدم در نظر گرفتن ارتعاشات خود القا و استفاده از تقریب خطی و ضریب استهلاک ویسکوز برای مدل‌سازی استهلاک ناشی از ساختار تکیه‌گاه کمکی می‌باشد.

نتیجه‌گیری

بررسی‌های تجربی و تئوری ارائه شده بیانگر این مطلب هستند که در طراحی فیکسچر در صورت نیاز به تعبیه تکیه‌گاه کمکی، باید با در نظر گرفتن کلیه پارامترهای موقعیت، صلبیت، قابلیت میرایی و میزان پیش‌بار تکیه‌گاه به همراه صلبیت قطعه کار و صلبیت ساختاری مجموعه روبنده‌ها و جاسازها و میزان بارهای ماشینکاری، طراحی بهینه تکیه‌گاه کمکی انجام گیرد و طراح نمیتواند به این قانون مرسوم یعنی: "تعبیه تکیه‌گاه کمکی بدون توجه به نوع، پیش‌بار و سایر پارامترهای آن، در وسط مسیر ماشینکاری زیر قطعه یا درست زیر بار ماشینکاری" اکتفا نماید.

قدردانی

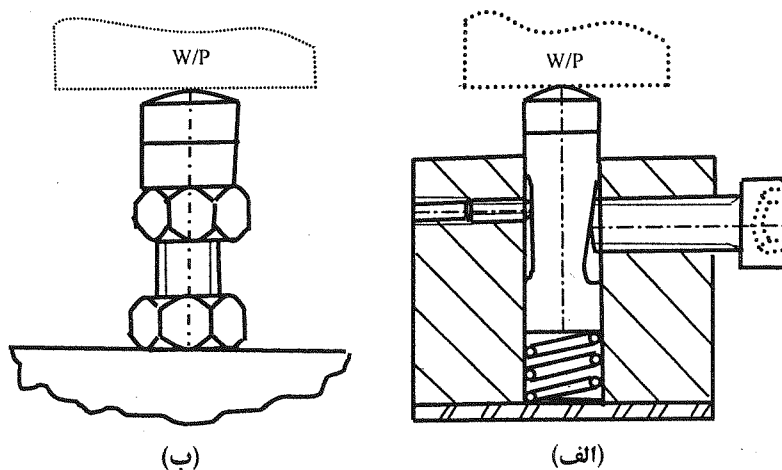
در اینجا لازم است از شرکت "موادکاران جاهد نوآور" که پره‌های توربین ریخته‌گری شده در آن شرکت را جهت تست‌های ماشینکاری در اختیار پروژه قرار داده‌اند، قدردانی و تشکر گردد.

فهرست علائم

- 6×6 [C]: ماتریس ضریب استهلاک
- 3×1 [d]: بردار جابجایی خطی استاتیک قطعه کار نسبت به ابزار برشی (m)
- 3×1 [D]: بردار جابجایی خطی دینامیک قطعه کار نسبت به ابزار برشی (m)
- F_{li} : نیروی عکس‌العمل جاساز عمود بر سطح قطعه کار (N)
- F_{cj} : نیروی عکس‌العمل روبنده عمود بر سطح قطعه کار (N)
- F_{sk} : نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاه کمکی عمود بر سطح قطعه کار (N)
- F_{cj0} : نیروی سفت شدن اولیه روبنده (N)
- F_{sk0} : نیروی پیش‌بار اولیه اعمالی از سوی تکیه‌گاه به قطعه کار (N)
- f_{lix} : نیروی عکس‌العمل مماسی جاساز در راستای محور X (N)
- f_{liy} : نیروی عکس‌العمل‌های جاساز در راستای محور Y (N)
- $[F_m(t)]$: تحریک هارمونیک ناشی از نیروی ماشینکاری (N)
- K_{li}, K_{cj}, K_{sk} : ضریب سختی معادل تکیه‌گاه‌های کمکی، روبنده‌ها و جاسازها (N/m)
- 6×6 [M]: ماتریس اینرسی
- 3×1 [n]: بردار نرمال قطعه کار
- 3×1 [r]: بردار موقعیت اجزاء فیکسچر
- $[r_m]$: بردار موقعیت محل ماشینکاری
- [R], [M]: بردارهای گشتاور و نیروی ماشینکاری

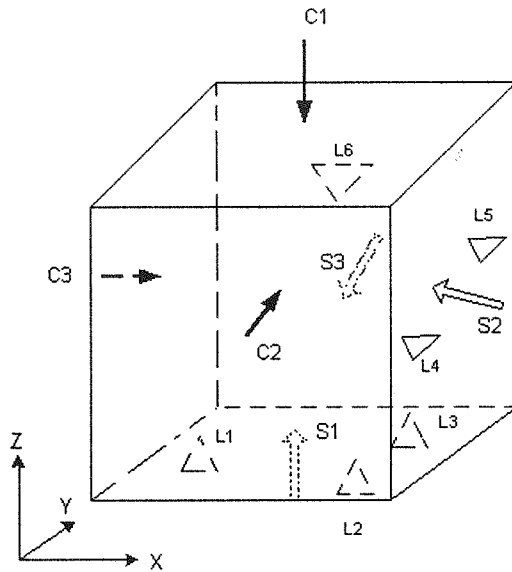
فهرست علائم یونانی

- δ_{li} : جابجایی قطعه کار در محل تماس با جاسازها (m)
- $\delta_{st}, \delta_{dyn}$: خطای ناشی از جابجایی استاتیکی و دینامیکی قطعه کار در محل تماس ابزار (m)
- Δ : تغییر شکل الاستیک اجزاء فیکسچر (m)
- $[\theta]$: بردار جابجایی دورانی استاتیک قطعه کار (مدل سه‌بعدی)
- $[\Theta]$: بردار جابجایی دورانی دینامیک قطعه کار (مدل سه‌بعدی)

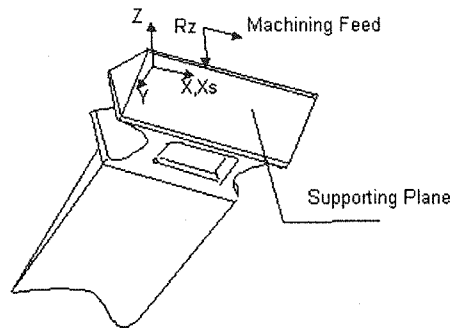
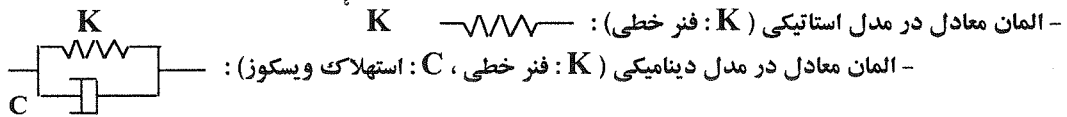


شکل (۱) دو طرح عمده تکیه‌گاه‌های کمکی

الف - جک پین، ب - جک پیچی.



شکل (۲) مدل سازی مجموعه قطعه کار و فیکسچر
(المان معادل برای جاسازها، L، روبنده‌ها C و تکیه‌گاههای کمکی S)



شکل (۳) قطعه کار مورد استفاده در تستهای ماشینکاری.

جدول (۱) مختصات اجزاء فیکسچر و مسیر ماشینکاری در تستهای ماشینکاری.

	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
L1	۵۵	۱۲۸	۲۰
L2	۷۰	۴۶	۰
L3	۴۰	۴۶	۰
L4	۹۴	۶	۱۵
L5	۹۴	۲۶	۱۵
L6	۴۶	۵۶	۱۰
C1	۵۰	۸۸	۳۲
C2	۰	۱۵	۱۵
C3	۴۶	۰	۱۵
S1	Xs	۱۰	۸
*M	Xm	۱۰	۱۹

*M: مسیر ماشینکاری

جدول (۲) مختصات اجزاء فیکسچر و مسیر ماشینکاری در تستهای سنگزنی.

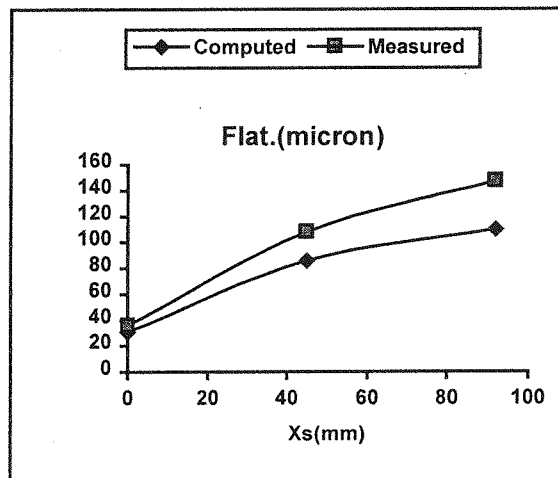
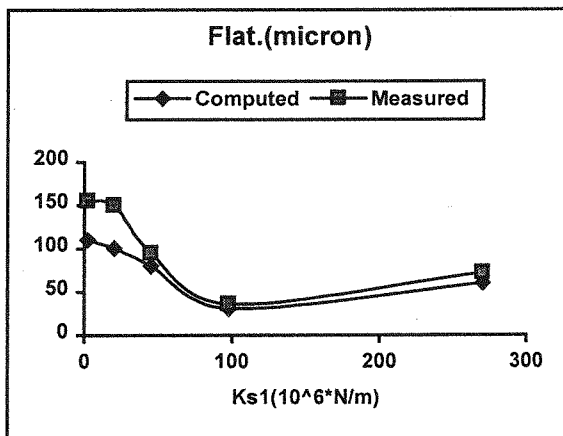
	(X (mm	(Y (mm	(Z (mm
L1	۴۸	۱۴۸	۴۸
L2	۱۸	۴۴	۲۳
L3	۵۸	۴۴	۲۳
L4	۹۴	۸	۲۴
L5	۹۴	۳۳	۲۴
L6	۳۸	۵۶	۲۶
C1	۴۱	۸۶	۵۴
C2	.	۲۳	۲۴
C3	۳۸	.	۲۶
S1	Xs	۱۰	۳۳
M*	Xm	۱۰	۴۲

M* : مسیر ماشینکاری

جدول (۳) نتایج تجربی اثر میرایی تکیه‌گاه کمکی بر زبری سطح حاصل از ماشینکاری.

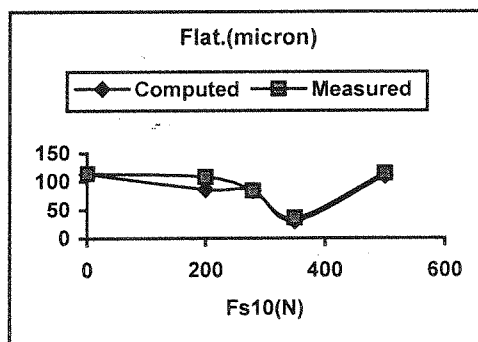
(Measured Rough.(micron			
Support Tip Material (Size)	Steel (۱,۷۱۳۱)	PE t*=3mm	PE• t=15mm
Stiffness/Dampig	High/low	Low/low	Low/high
Rz(micron)	۶	۲۰	۱۰

* ضخامت نوک تعویض شونده تکیه‌گاه کمکی پلی‌اتیلن

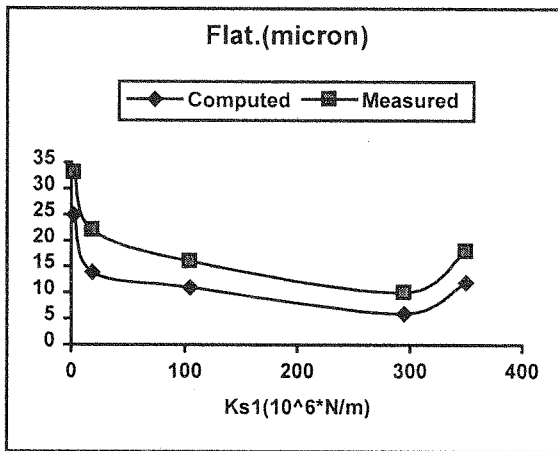


منحنی (۱-ب) نمودار تغییرات تختی سطح حاصل از ماشینکاری نسبت به صلبیت تکیه‌گاه کمکی (فرزکاری، پره چدنی GG25، میزان پیش‌بار: ۲۰۰N).

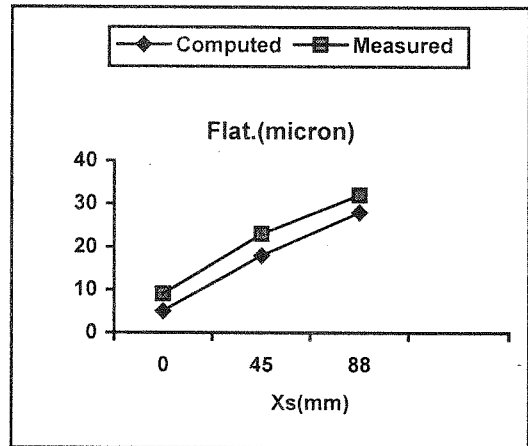
منحنی (۱-الف) نمودار تغییرات تختی سطح حاصل از ماشینکاری نسبت به موقعیت تکیه‌گاه کمکی (فرزکاری، پره چدنی GG25، جنس تکیه‌گاه کمکی: فولاد ۱,۷۱۳۱).



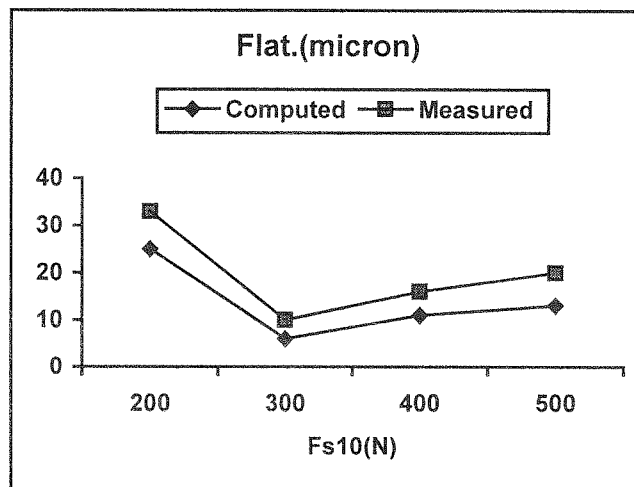
منحنی (۱-ج) نمودار تغییرات تختی سطح حاصل از ماشینکاری نسبت به میزان پیش‌بار تکیه‌گاه کمکی (فرزکاری، پره چدنی GG25، جنس تکیه‌گاه کمکی: فولاد ۱,۷۱۳۱).



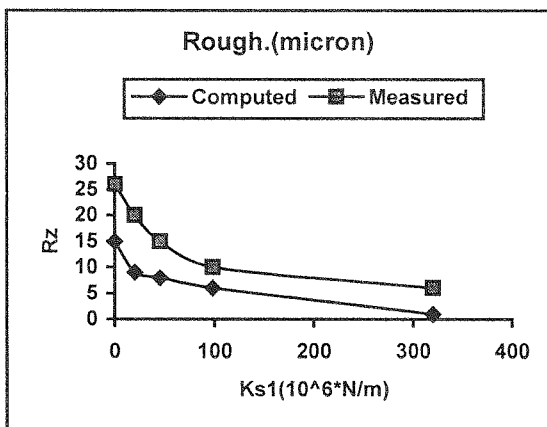
منحنی (۲-ب) نمودار تغییرات تختی سطح حاصل از ماشینکاری نسبت به صلیبیت تکیه‌گاه کمکی (سنگزنی خزشی، پره اینکونل LCY۳۸، میزان پیش‌بار: ۲۲۰۰)



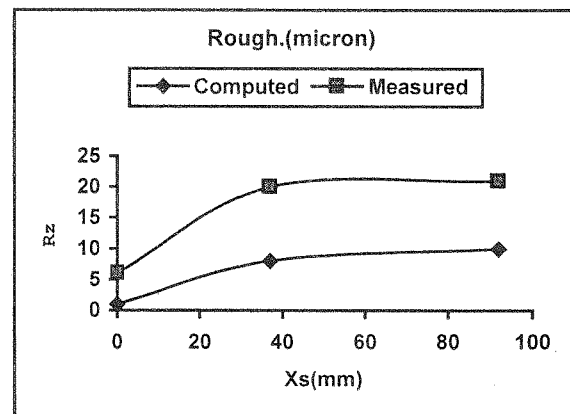
منحنی (۲-الف) نمودار تغییرات تختی سطح حاصل از ماشینکاری نسبت به موقعیت تکیه‌گاه کمکی (سنگزنی خزشی، پره اینکونل LCY۳۸، جنس تکیه‌گاه کمکی: فولاد ۱.۷۱۳۱).



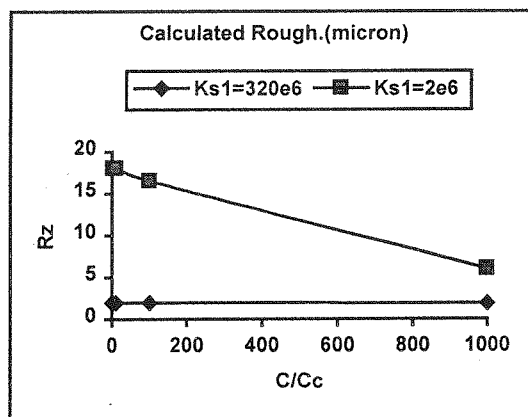
منحنی (۲-ج) نمودار تغییرات تختی سطح حاصل از ماشینکاری نسبت به میزان پیش‌بار تکیه‌گاه کمکی (سنگزنی خزشی، پره اینکونل LCY۳۸، جنس تکیه‌گاه کمکی: فولاد ۱.۷۱۳۱).



منحنی (۳-ب) نمودار تغییرات زبری سطح حاصل از ماشینکاری نسبت به صلیبیت تکیه‌گاه کمکی (فرزکاری، پره چدنی GG25، جنس تکیه‌گاه کمکی: فولاد ۱.۷۱۳۱).



منحنی (۳-الف) نمودار تغییرات زبری سطح حاصل از ماشینکاری نسبت به موقعیت تکیه‌گاه کمکی (فرزکاری، پره چدنی GG25، جنس تکیه‌گاه کمکی: فولاد ۱.۷۱۳۱).



منحنی (۳-ج) نتایج مدل‌سازی اثر نسبت میرایی تکیه‌گاه کمکی بر زبری سطح حاصل از ماشینکاری (فرزکاری، پره چدنی GG25، $C_c=6280\text{N.s/m}$ ، $X_s=0\text{mm}$).

مراجع

- [1] G. S. A. Shawki, M. M. Abdel-Aal, "Effect of Fixture Rigidity and Wear on Dimensional Accuracy", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 5, pp. 183-202, 1965.
- [2] G. S. A. Shawki, M. M. Abdel-Aal, "Rigidity Considerations in Fixture Design-Contact Rigidity at Locating Elements", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 6, pp. 31-43, 1966.
- [3] G. S. A. Shawki, M. M. Abdel-Aal, "Rigidity Consideration in Fixture Design-Rigidity of Clamping Elements", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 6, pp. 207-220, 1966.
- [4] J. D. Lee, L. S. Haynes, "Finite Element Analysis of Flexible Fixturing System", ASME J. Engineering for Industry, Vol. 109, pp. 134-139, 1987.
- [5] R. J. Menassa, W. R. Devries, "Optimization Methods Applied to Selecting Support Positions in Fixture Design", ASME J. Engineering for Industry, Vol. 113, pp. 412-418, 1991.
- [6] Y. Rong, Y. Bai, "Machining Accuracy Analysis for Computer-aided Fixture Design Verification", ASME J. Manufacturing Science and Eng., Vol. 118, pp. 289-300, 1996.
- [7] W. Cai, S. J. Hu, J. X. Yuan, "A Variational Method of Robust Fixture Configuration Design for 3-D Workpieces", ASME J. Manufacturing Science and Eng., Vol. 119, pp. 593-602, 1997.
- [8] S. A. Choudhuri, E. C. DeMeter, "Tolerance Analysis of Machining Fixture Locators", ASME J. Manufacturing Science & Eng., Vol. 121, pp. 273-281, 1999.
- [9] V. Bhat, E. C. De Meter, "An Analysis of the Effect of Datum-Establishment Methods on the Geometric Errors of Machined Features", Int. J. Mach. Tools & Manufacture, Vol. 40(13), pp. 1951-1975, 2000.
- [10] E. C. De Meter, W. Xie, S. Choudhuri, S. Vallapuzha, M. W. Trethewey, "A Model to Predict Minimum Required Clamp Pre-loads in Light of Fixture-Workpiece Compliance", Int. J. Mach. Tools & Manufacture, Vol. 41(7), pp. 1031-1054, 2001.
- [11] M. Daimon, T. Yoshida, N. Kojima, h. Yamamoto, "Study for Designing Dynamics of Thin-Walled Plate- and Box-Like Workpieces", Annals of the CIRP, Vol. 34-1, pp. 319-322, 1985.
- [12] R. O. Mittal, P. H. Cohen, B. J. Gilmore, "Dynamic Modeling of The Fixture-Workpiece System", Robotics & Computer Integrated Manufacturing, Vol. 8, No. 4, pp. 201-217, 1991.
- [13] M. J. Hockenberger, E. C. DeMeter, "The Application of Meta Functions to The Quasi-Static Analysis of Workpiece Displacement Within a Machining Fixture", ASME J. Manufacturing-Science and Eng., Vol. 118, pp. 325-331, 1996.
- [14] M. R. Behzadi, B. Arezoo, "The Effect of Additional Support Parameters on Machining Accuracy: Part 1- Flexible Workpiece", SME 4th International Machining & Grinding Conf., Michigan, May 7-10, SME Technical Paper: MR01-332, 2001.
- [15] M. R. Behzadi, B. Arezoo, "The Effect of Additional Support Parameters on Machining Accuracy: Part 2- Rigid Workpiece", SME 4th International Machining & Grinding Conf., Michigan, May 7-10, SME Technical Paper: MR01-333, 2001.